بررسی تأثیر خاک‌اره برروی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های رسی*

روزبه تدین(۱) روزبه دبیری(۲)

چکیده در این پژوهش تأثیر ذرات خاک‌ارهٔ درخت کاج برروی خصوصیات ژئوتکنیکی دو نوع خاک رس کائولنی بررسی شده‌است، به‌طوری‌که خاک‌اره با درصدهای وزنی ۳، ٦ و ۹ به‌صورت خشک به دو خاک کائولنی با خصوصیات خمیری مختلف به‌صورت تصادفی مخلوط گردیده‌است. در ادامه، نمونه‌های ساخته‌شده تحت آزمایش‌های تراکم، تک‌محوری، نفوذپذیری (با ارتفاع متغیر)، تحکیم و برش مستقیم (خشک و اشباع) قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد، زمانی‌که ۳ ٪ خاک‌اره به نمونه‌های مورد مطالعه افزوده گردد سبب کاهش نسبت تخلخل حداقل (e_{min}) در بین ذرات خاک کائولن با خاصـــیت خمیری بالا به‌میزان ۲٤ ٪ می‌شـــود. هم‌چنین در این شـــرایط افزایش در مقاومت و ظرفیت باربری، تراکم‌پذیری و کاهش جذب آب به‌وقوع می‌پیوندد.

واژه‌های کلیدی خاک رسی، خاک‌اره، رفتار ژئوتکنیکی، مقاومت برشی، تحکیم، نفوذپذیری.

Effects of Sawdust on Geotechnical Properties of Clayey Soils

R. Tadayyon R. Dabiri

Abstract *In this research, effects of pine tree sawdust on geotechnical properties of two types of kaolinite clayey soil was evaluated. So that, sawdust in 3, 6 and 9 percent (by weight) in dry condition randomly mixed with two kaolinite clayey soil with different plasticity index. Compaction, uniaxial, permeability (falling head) and consolidation tests were performed on specimen. Results showed while 3% sawdust mixed to samples, 24% minimum void ratio (e_{min}) decreased in kaolinite clay with high plasticity index. Also, in this condition, increasing of bearing capacity and strength, ductility and decreasing in water absorbing have been happened.*

Key Words Clayey soil, Sawdust, Geotechnical behavior, Shear strength, Consolidation, Permeability.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۷/۲/۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۱۰/۲۹ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد مهندسی عمران– ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز. **Email:** rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir

مقدمه

در سیستم نام‌گذاری متحد خاک‌ها، کلیهٔ ذراتی که اندازهٔ آنها از ۰/۰۷۵ میلی‌متر کمتر باشد در طبقهٔ ریزدانه‌ها قرار می‌گیرند. اگر این‌گونه خاک‌ها در صورت مخلوط شدن با مقدار محدودی آب خاصیت خمیری از خود نشان دهند، در طبقهٔ رس و در غیر این صورت در بخش لای قرار می‌گیرند. خاک‌های متورم‌شونده با تغییر درصد رطوبت تغییر حجم قابل ملاحظه‌ای از خود نشان می‌دهند که افزایش درصد رطوبت تورم و کاهش آن انقباض این گونه خاک‌ها را در پی دارد. انقباض و اتساع خاک‌های متورم‌شونده خسارت‌های قابل ملاحظه‌ای را به زیرساخت‌ها وارد می‌کنند [1]. خاک‌اره محصول برش، سمباده زدن و یا در غیر این صورت ساییدن چوب با اره یا ابزار دیگر است و از ذرات ریز چوب تشکیل می‌شود. زائدات خاک‌ارهٔ چوب در تمام کشورهای جهان انباشته می‌شوند و مشکلات زیست‌محیطی جدی و خطرات سلامتی گوناگونی را موجب می‌شوند و از آنجایی که تولید زائدات چوبی در کارخانه‌های چوب‌بری و صنایع چوبی گوناگون غیرقابل اجتناب است، لذا برای استفاده از این زائدات تلاش زیادی به‌عمل می‌آید [۲]. هم‌چنین، به‌منظور تثبیت و به‌سازی خاک‌های مسئله‌دار، روش‌های مختلف موجود است که برپایهٔ تئوری‌های مکانیکی و واکنش‌های شیمیایی بنا نهاده شده‌اند [5-3]. انتخاب روش‌های موجود تابع پارامترهای مختلفی همچون نوع خاک، ساختار دانه‌بندی خاک، مهارت، نوع تجهیزات، مواد مصرفی و هزینهٔ اجرای آنها می‌باشد. انجمن ادارهٔ راه‌وترابری آمریکا در سال ۲۰۱٦ [6] روش‌های مختلف به‌سازی خاک‌ها را به‌همراه هزینهٔ اجرای آنها طبق جدول (۱) ارائه نموده‌است. با مقایسهٔ هزینه‌ها می‌توان مشاهده کرد، خاک‌اره به‌دلیل گستردگی در تهیهٔ آن و قیمت بسیار پایین، امکان استفاده از آن را درجهت به‌سازی خاک‌ها ارائه می‌نماید؛ بنابراین در این تحقیق سعی بر آن است تا بتوان با به‌کارگیری خاک‌اره، ویژگی‌های مکانیکی خاک ریزدانهٔ رسی را اصلاح کرد و از آلودگی محیط زیست و خسارت‌های ناشی از استفاده کردن از خاک‌های متورم‌شونده و هزینه‌هایی که در پی دارد جلوگیری نمود.

درزمینهٔ تثبیت خاک‌های ریزدانه توسط خاک‌اره مطالعات گسترده‌ای انجام یافته‌است. کافی و همکاران در سال ۱۳۹۰ [۷] در مطالعهٔ خود دریافتند که حضور خاک‌اره و بنتونیت در خاک رس باعث بهبود در جذب رنگ پساب‌های صنعتی شده‌است. نتایج تحقیق سیروس‌پور و همکاران در سال ۱۳۹٦ [۸] نشان داد که حضور خاک‌اره باعث حذف بیشتر نیترات می‌گردد. چمانی و همکاران [9] با هدف فراهم کردن مصالح ساختمانی سبک، تأثیر خاک‌اره را برروی ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی آجرهای سفالی مورد بررسی قرار دادند. نتیجهٔ تحقیق نشان داد انقباض نمونه‌ای که در آن از خاک‌ارهٔ حاصل از درخت کاج استفاده شده بود نسبت‌به نمونه‌ای که در آن از خاک‌ارهٔ حاصل از درخت اکالیپتوس استفاده شده بود، بسیار بیشتر بود. رائو کاتسوارا [10] و همکاران مشاهده نمودند که تورم آزاد نسبی خاک رس با افزودن ۱۵ درصد خاک‌اره، ٦۲/۸۵ درصد و با افزودن ٤ درصد آهک، ۷۲/۱٤ درصد کاهش می‌یابد. در تحقیقات صورت‌گرفته توسط مانوکاجی [1] مشاهده شد که در خاک رس پایتخت نیجریه حد انقباض خطی با افزایش میزان خاک‌اره از مقدار میانگین ۸/۵۷ به ۸/۳۲ درصد به‌طور یکنواخت کاهش پیدا کرده و وزن مخصوص خشک حداکثر با افزایش میزان خاک‌اره از مقدار میانگین ۳/۱۸ به ۲/۹۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب به‌طور یکنواخت کاهش یافته و پوکی با افزایش میزان خاک‌اره از مقدار میانگین ۱۳ به ۱۷ درصد افزایش پیدا کرده و به‌مقدار قابل قبول (بین ۲۰ تا ۸۰ درصد) نزدیک‌تر شده‌است. نتایج مطالعات صورت‌گرفته توسط ایده و همکاران [11] نشان داد که با افزایش میزان خاکستر

خاک‌ارهٔ مورد استفاده در خاک رس حد روانی، حد خمیری، نشانهٔ خمیری و انقباض خطی کاهش پیدا کرد؛ هم‌چنین با افزایش میزان خاکستر خاک‌اره، چگالی خشک حداکثر نمونه‌های حاوی خاک و خاکستر کاهش یافت، درحالی‌که رطوبت بهینهٔ آنها افزایش پیدا کرد. در تحقیق انجام‌یافته به‌وسیلهٔ الحالم و البرودی [12] مشاهده شد که با افزایش درصد خاک‌اره ضریب نفوذپذیری خاک رس به‌شدت افزایش می‌یابد.

جدول ۱ مقایسهٔ هزینه‌های روش‌های به‌سازی خاک [6]

هزینه (دلار)	تکنولوژی	طبقه‌بندی
۰/۵–٤ (هر یک فوت)	پیش بارگذاری، همراه و یا بدون خاکریز	زهکشی قائم و تحکیم شتاب داده‌شده
۷۵–۱۵۰(هر یارد مکعب)	خاکریز با مقاومت فشاری، ژئوفوم، بتن فومی	خاکریزهای سبک
۳–۱۵ (هر یارد مکعب)	خاکریزی با مصالح دانه‌ای، الیاف چوب، سربارهٔ کورهٔ فولاد، خاکستر بادی، الیاف تایر، شیست خاک رسی	خاکریزی‌های سبک
۱۰–۳۰ (هر یارد مکعب)	تراکم دینامیکی عمیق	تراکم عمیق
۵–۹ (هر یک فوت)	تراکم ویبره‌ای	تراکم عمیق
۱۵–٦۰ (هر فوت)	ستون‌های سنگی	ستون‌های مصالح دانه‌ای
۹(برای هر فوت مربع)+ هزینهٔ اجرای ستون	خاکریزهای تقویت‌شده با ستون	خاکریزهای تقویت‌شده با ستون
۳۰–۸۰ (هر فوت)	ستون‌ها: غیرفشرده	خاکریزهای تقویت‌شده با ستون
۲۰–۱۰۰(هر فوت)	ستون‌ها: غیرفشرده	خاکریزهای تقویت‌شده با ستون
٦۰–۱۲۵ (هر فوت)	مخلوط عمیق (خشک)	خاک مخلوط
۱۵–۷۵ (هر یارد مکعب)	اختلاط توده‌ای	خاک مخلوط
۲۰ (هر فوت)	تزریق شیمیایی	تکنولوژی تزریق
۷۵–۷۵۰ (هر یارد مکعب)	تزریق به‌همراه تراکم	تکنولوژی تزریق
۵۰–۱۵(هر یارد مکعب)	پر کردن فضاهای خالی	تکنولوژی تزریق
٦/۵–۹/۵ (هر فوت مربع)	تثبیت کف	تکنولوژی تزریق
۲۵۰–۷۵۰ (هر یارد مکعب)	تزریق جت	تکنولوژی تزریق
۲۵–۸۰ (فوت مربع)	تزریق ترک‌های سنگ	تکنولوژی تزریق
۱–۵ (هر یارد مربع)	روش‌های مکانیکی	روش‌های به‌سازی روسازی راه
۲–۵ (هر یارد مربع)	روش‌های شیمیایی	روش‌های به‌سازی روسازی راه
۳–۱۲ (هر فوت)	کنترل رطوبت	روش‌های به‌سازی روسازی راه
۲–۱۲ (هر یارد مربع)	خاکریز مسلح	خاک مسلح
۳۰–٦۵ (هر فوت مربع)	دیوارهای مسلح انعطاف‌پذیر	خاک مسلح
۳–۲۵(هر فوت مربع)	شیب‌های خاکی مسلح‌شده	خاک مسلح
۲۰–۵۰ (هر فوت)	میخ‌کوبی	خاک مسلح

تأثیر خاک‌اره در خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس حاصل از ٤ ایالت واقع در نیجریه توسط اولابایوده و همکاران [13] مورد مطالعه قرار گرفت. ایشان دریافتند که نمونه‌های بدون خاک‌اره مقاومت بالاتری از خود نشان دادند و با افزودن خاک‌اره به خاک رس، مقاومت فشاری آن کاهش پیدا کرد. ناراناگودا و همکاران [14] مشاهده کردند که درصد رطوبت بهینهٔ خاک رس درصورت استفاده از ۱۰ درصد خاکستر خاک‌اره و ۱۰ درصد خاکستر بادی کاهش پیدا کرد و افزودن خاکستر بادی و خاکستر خاک‌اره به خاک، سبب افزایش چگالی خشک حداکثر آن شد. در مطالعهٔ صورت‌گرفته توسط خان و همکاران [15] مشاهده شد با افزودن خاکستر خاک‌اره به خاک رس، ضریب نفوذپذیری نسبت‌به حالت اولیه کاهش پیدا کرد. در تحقیقات صورت‌گرفته توسط کومارو جاین [16] افزودن خاکستر خاک‌اره به نمونهٔ خاکی رسی مشاهده گردید که مقادیر زاویهٔ اصطکاک داخلی و چسبندگی بهبود یافته‌است و مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر با افزودن خاکستر خاک‌اره افزایش یافته‌است و شاخص خمیری خاک رسی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته‌است. با مرور تحقیقات صورت‌گرفته مشاهده می‌گردد، خاک‌ارهٔ ریز درخت کاج درجهت بررسی تأثیر آن بر خصوصیات خمیری، ساختار دانه‌بندی و فضای خالی بین ذرات خاک رس به‌منظور تثبیت و ارزیابی رفتار ژئوتکنیکی کمتر مدنظر واقع شده‌است. این امر از نوآوری‌های مطالعهٔ حاضر می‌باشد.

مواد و مصالح

هم‌چنان‌که در بخش‌های گذشته به آن اشاره گردید، هدف از تحقیق حاضر، امکان بررسی تأثیر ذرات خاک‌اره برروی ویژگی‌های مکانیکی و رفتاری خاک رسی است. برای تحقیق حاضر، دو نوع خاک رس کائولن با شاخص-های خمیری متفاوت از کارخانهٔ صنایع خاک چینی ایران در نزدیکی شهر مرند با نام‌های تجاری SZWMK1 و ZMK2 تهیه گردیده‌است. در ادامه به‌منظور ارائه و مقایسهٔ نتایج مطالعه، خاک‌های مذکور به‌ترتیب نوع ۱ و نوع ۲ نام‌گذاری شدند. تصویر نمونه‌هایی از خاک‌های رسی کائولن در شکل (۱- الف و ب) ارائه شده‌است. هم‌چنین، خصوصیات شیمیایی و درصد کانی آنها طبق جدول (۲) قابل مشاهده‌است.

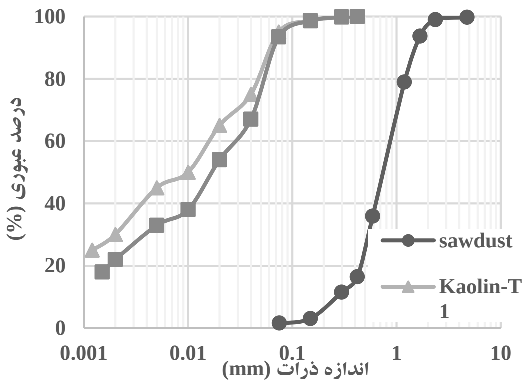


شکل ۱ تصاویر مصالح مورد مطالعه در تحقیق حاضر: الف) کائولن نوع ۱، ب) کائولن نوع ۲، ج) خاک‌اره.

جدول ۲ خصوصیات شیمیایی و درصد کانی خاک‌های رس کائولن مورد مطالعه [17]

مادهٔ تشکیل‌دهنده	درصد وزنی عناصر در کائولن SZWMK1 (نوع ۱)	درصد وزنی در کائولن ZMK2 (نوع ۲)
L.O.I	۹	٦
SiO_2	٦٣	٧٤
Al_2O_3	٢٤	١٥
Fe_2O_3	٠/٥٥	٠/٤٥
TiO_2	٠/٠٤	٠/٠٤
CaO	١/٢	١/٥
MgO	٠/٥٥	٠/٤
Na_2O	٠/٤	٠/٣٥
K_2O	٠/٣	٠/٣
SO_4	–	–

خاک‌ارهٔ مورد استفاده در پژوهش حاضر، مربوط به درخت کاج روسی است که از کارگاه چوب‌بری تهیه شده‌است و قبل از استفاده برای انجام آزمایش‌ها کاملاً خشک گردیده‌است. تصویر ظاهری خاک‌ارهٔ تهیه‌شده مطابق شکل (۱- ج) قابل مشاهده‌است. منحنی دانه‌بندی مصالح مورد مطالعه طبق استاندارد ASTM D421 [18] و ASTM D422 [19] تعیین گردیده‌است که می‌توان آن را در شکل (۲) مشاهده نمود. برای آن‌که بتوان تأثیر خاک‌اره را در تحقیق حاضر به‌طور مناسب ارزیابی نمود، با در نظر گرفتن منحنی دانه‌بندی خاک رس کائولنی، اندازهٔ ذرات خاک‌اره کوچک‌تر از ۱/۱۹ میلی‌متر انتخاب شد. هم‌چنین براساس منحنی‌ها می‌توان مشاهده نمود براساس سیستم نام‌گذاری متحد، خاک‌های رسی کائولن مورد مطالعه از نوع CL است که خصوصیات خمیری آنها طبق استاندارد ASTM D4318-95a [20] و چگالی ویژه نیز طبق استاندارد ASTM D854 [21] برآورد شده که در جدول (۳) ارائه شده‌است. نوع کانی‌ها و درصدهای آنها در خاک‌های رسی کائولن مورد مطالعه در جدول (٤) قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲ منحنی دانه‌بندی مصالح مورد مطالعه در تحقیق حاضر

جدول ۳ ویژگی های ژئوتکنیکی مصالح مخلوط مورد مطالعه

خصوصیات ژئوتکنیکی	رس کائولن نوع ۲	رس کائولن نوع ۱
PI	۱۱	۱۵
Gs		
درصد خاک‌اره	رس کائولن نوع ۲	رس کائولن نوع ۱
۰	۲/٦٥	۲/٦۲
۳	۲/۷	۲/۷۲
٦	۲/۵۲	۲/٦۵
۹	۲/۵۸	۲/۷۹

جدول ٤ نوع و درصد وزنی کانی‌ها در خاک‌های رسی کائولن مورد مطالعه [17]

نوع کانی	کائولن نوع ۱	کائولن نوع ۲
کائولینیت	٦٤	٤١
کوارتز	۲۷	۵۲
کلسیت	۲/۱	۳
سایر	٦	٤

کارهای آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر، خاک‌های رسی کائولن با خاک‌اره با درصدهای وزنی ۳، ٦ و ۹ مخلوط شده‌است تا امکان بهبود خصوصیات مکانیکی و ژئوتکنیکی خاک‌های رسی ارزیابی گردد. بدین منظور ابتدا آزمون تراکم آزمایشگاهی طبق استاندارد ASTM D698 [22] انجام گرفت. سپس،

برای تعیین پارامترهای رفتاری خاک‌های رسی کائولن تثبیت‌شده با خاک‌اره، در مرحلهٔ اول آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری طبق استاندارد ASTM D2166 [23] صورت پذیرفت. در مرحلهٔ دوم، آزمون برش مستقیم در دو حالت خشک و اشباع طبق استاندارد ASTM D3080-11 [24] برروی نمونه‌های با ابعاد ۱۰× ۱۰ سانتی‌متر مربع به‌صورت کنترل کرنش تحت اثر تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال صورت گرفت. لازم به یادآوری است در حالت اشباع، نمونه‌ها به‌مدت ۲٤ ساعت تحت اثر بارگذاری قائم قرار گرفتند تا عملیات تحکیم به اتمام برسد. سپس با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه آزمایش انجام گرفت. در حالت خشک، عملیات بارگذاری نمونه‌های مورد مطالعه با سرعت ۱/۲۵ میلی‌متر بر دقیقه صورت گرفت. در مرحلهٔ سوم، برای بررسی تأثیر خاک‌اره برروی میزان نفوذپذیری، نشست تحکیم و درصد تورم خاک‌های رسی مورد مطالعه، ابتدا آزمایش نفوذپذیری با ارتفاع متغیر طبق استاندارد ASTM D5084 [25] انجام گرفت. سپس، میزان نشست تحکیم و درصد تورم بااستفاده از آزمایش تحکیم طبق استاندارد ASTM D2435 [26] صورت پذیرفت. برنامهٔ آزمایشگاهی صورت‌گرفته برروی نمونه‌های مورد مطالعه مطابق جدول (۵) قابل مشاهده است. لازم به‌ذکر است که ۲۵٪ از مجموع آزمایش‌های انجام‌یافته روی نمونه‌ها جهت تدقیق نتایج دوباره تکرار شده است.

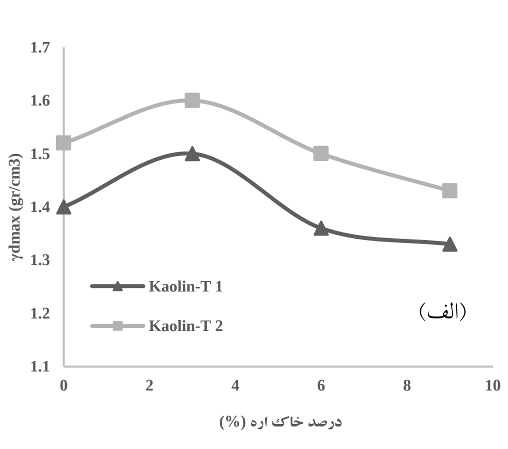
جدول ٥ برنامهٔ آزمون‌های صورت‌گرفته برروی نمونه‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر

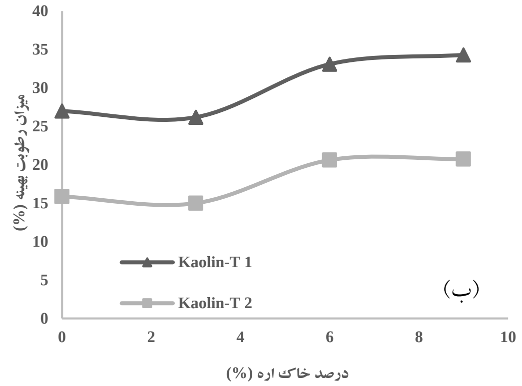
ردیف	نام نمونه	ماتریس خاک	درصد خاک‌اره	آزمایش‌های انجام‌یافته						
				حدود آتربرگ	چگالی ویژه	تراکم	تک محوری	برش مستقیم(خشک)	برش مستقیم(اشباع)	تحکیم
۱	T1-0	کائولن نوع ۱ (T1)	۰	❊	❊	❊	❊	❊	❊	❊
۲	T1-03	کائولن نوع ۱ (T1)	۳	❊	❊	❊	❊	❊	❊	❊
۳	T1-06	کائولن نوع ۱ (T1)	٦	❊	❊	❊	❊	❊	❊	❊
٤	T1-09	کائولن نوع ۱ (T1)	۹	❊	❊	❊	❊	❊	❊	❊
٥	T2-0	کائولن نوع ۲ (T2)	۰	❊	❊	❊	❊	❊	❊	❊
٦	T2-03	کائولن نوع ۲ (T2)	۳	❊	❊	❊	❊	❊	❊	❊
۷	T2-06	کائولن نوع ۲ (T2)	٦	❊	❊	❊	❊	❊	❊	❊
۸	T2-09	کائولن نوع ۲ (T2)	۹	❊	❊	❊	❊	❊	❊	❊

نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمایش تراکم

نتایج به‌دست‌آمدۀ حاصل از آزمون تراکم آزمایشگاهی در شکل (۳-الف و ب) ارائه شده‌است. باتوجه به نمودارها می‌توان دریافت که وزن مخصوص خشک حداکثر در شرایطی که خاک‌اره افزوده نشده‌است در خاک کائولن نوع ۲ به‌دلیل پایین بودن خصوصیات خمیری و وجود درصد کوارتز بالا در مقایسه با کائولن نوع ۱ دارای مقدار بالایی است. هنگامی‌که به مصالح مورد مطالعه خاک‌اره افزوده گردید، مشاهده شد که در ۳٪ وزنی خاک‌اره، وزن مخصوص خشک حداکثر افزایش یافت و رطوبت بهینه کاسته شد. میزان افزایش در وزن مخصوص خشک حداکثر در خاک کائولن نوع ۱ و نوع ۲ به‌ترتیب ۷/۱٤٪ و۵/۳٪ بود و کاهش در مقدار رطوبت بهینه نیز به‌ترتیب ۳٪ و ۵/۵٪ بود. این شرایط بیان‌کنندۀ آن است که تأثیر خاک‌اره برروی خاک کائولن با خاصیت خمیری پایین بیشتر است؛ به‌گونه‌ای که ۳٪ خاک‌اره باعث کاستن فضای خالی بین ذرات کائولن می‌گردد و جذب رطوبت را کاهش می‌دهد. هم‌چنین، هنگامی‌که درصد خاک‌اره در کائولن‌ها افزایش یافت مشاهده شد هم‌زمان وزن مخصوص خشک کاهش و رطوبت بهینه افزایش یافت که بیان‌کنندۀ بالا رفتن درصد فضای خالی بین ذرات و افزایش میزان جذب آب است. این روند در مطالعات انجام‌یافته توسط مانوکاجی [1] و اولابایوده [13] نیز مشاهده شده‌است.



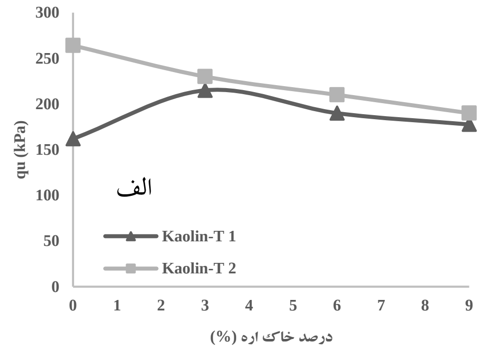


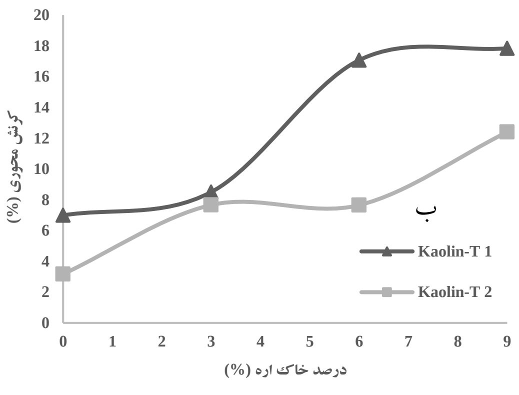
شکل ۳ نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش تراکم برروی مصالح مورد مطالعه: (الف) وزن مخصوص خشک حداکثر، (ب) رطوبت بهینه.

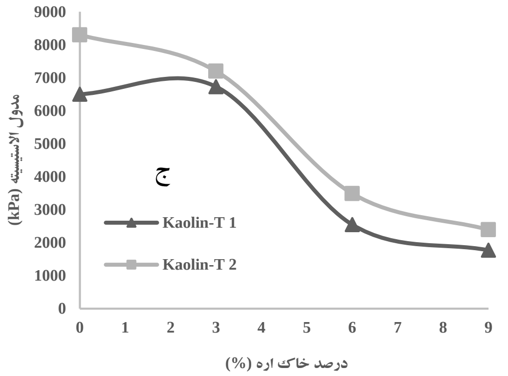
نتایج حاصل از آزمایش تک‌محوری

نتایج حاصل از نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری را طبق نمودارهای شکل (٤-الف، ب و ج) می‌توان مشاهده نمود. باتوجه به نمودارهای شکل (٤-الف) مشاهده می-گردد در شرایط تثبیت‌نشده، خاک رس کائولنی نوع ۲ دارای مقاومت فشاری بالاتری در مقایسه با خاک رس کائولنی نوع ۱ است. هنگامی‌که خاک‌اره به نمونه‌های مورد مطالعه افزوده شد، مشاهده گردید در کائولن نوع ۱ مقاومت فشاری تک‌محوری با حضور ۳٪ خاک‌اره به‌مقدار ۳۳٪ افزایش یافت و در ادامه، با افزایش درصد وزنی خاک‌اره مقدار توانایی باربری کاسته شد. در همین شرایط، مقاومت فشاری تک‌محوری کائولن نوع ۲ با حضور خاک‌اره کاهش یافت. این روند در دو نوع خاک رسی لاگوس و نیجر که توسط اولابایوده و همکاران [13] مورد مطالعه قرار گرفته‌است و از نظر مقدار شاخص خمیری به‌ترتیب نزدیک به کائولن‌های نوع ۱ و نوع ۲ تحقیق حاضر می‌باشد مشاهده شده‌است. وقوع این شرایط به آن علت است که در کائولن نوع ۱ خاصیت بالای چسبندگی و حضور پودر خاک‌اره (۳٪) باعث افزایش تماس ذرات به یکدیگر می‌شود و درنتیجه یک بهبودی نسبی در توانایی باربری به‌وقوع می‌پیوندد. کائولن نوع ۲، به‌دلیل بالا بودن درصد ذرات کوارتز و

پایین بودن خاصیت چسبندگی دارای توانایی باربری نسبی بالایی در مقایسه با کائولن نوع ١ است ولی حضور خاک‌اره باعث افزایش نسبی فضای خالی بین ذرات می‌گردد و درنتیجه کاهش توانایی به‌وقوع می‌پیوندد. در شکل (٤-ب) می‌توان مشاهده نمود که افزودن خاک‌اره به خاک‌های کائولنی باعث افزایش میزان کرنش محوری در لحظهٔ گسیختگی شده‌است. البته افزایش شکل‌پذیری در خاک کائولن نوع ١ باتوجه به خاصیت خمیری بالاتر، بیشتر است. باتوجه به شکل (٤-ج) می‌توان تأثیر خاک‌اره برروی تغییرات مدول الاستیسیته را مشاهد نمود. براین اساس می توان دریافت که افزودن ٣٪ خاک‌اره در کائولن نوع ١ باعث بهبود نسبی مدول الاستیسیته به‌میزان ٣/٥٪ شده‌است. خاک کائولن نوع ٢، اگرچه در هر دو حالت تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده دارای مقدار مدول الاستیسیتهٔ بالایی در مقایسه با کائولن نوع ١ است ولی افزودن خاک‌اره به آن باعث یک روند کاهشی در مدول الاستیسیته می‌گردد.





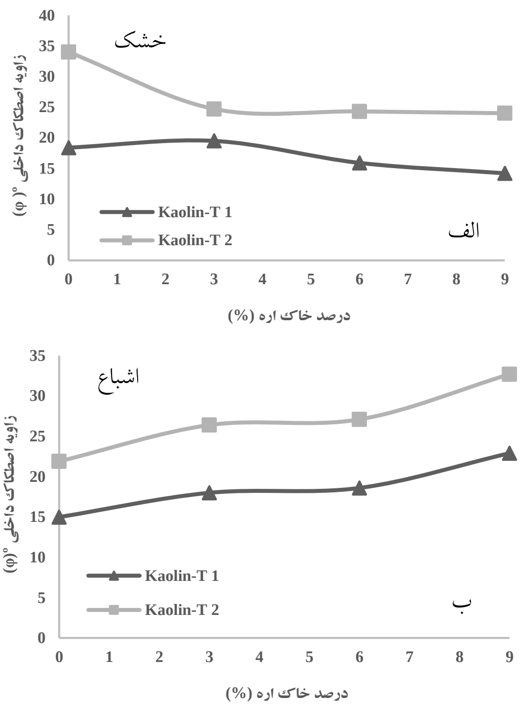


شکل ٤ نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری برروی مصالح مورد مطالعه: الف) مقاومت فشاری، ب) کرنش محوری در لحظهٔ گسیختگی، ج) مدول الاستیسیته.

نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم

تأثیر خاک‌اره برروی زاویهٔ اصطکاک داخلی(φ) خاک‌های رسی کائولنی در دو شرایط آزمایشی خشک و اشباع در شکل (٥- الف و ب) قابل مشاهده‌است. باتوجه به دیاگرام‌ها می‌توان دریافت، در حالت شرایط آزمایشی خشک و در وضعیت تثبیت‌نشده، خاک رس کائولن نوع ٢ دارای زاویهٔ اصطکاک بالاتری در مقایسه با خاک رس کائولن نوع ١ است. هم‌چنین، با مقایسهٔ دیاگرام‌ها در دو شرایط آزمایشی خشک و اشباع می‌توان دریافت که زاویهٔ اصطکاک داخلی نمونه‌ها در شرایط خشک در مقایسه با حالت اشباع دارای مقدار بالاتری است. در شرایط بارگذاری خشک هنگامی‌که خاک‌اره به نمونه‌های خاکی مورد مطالعه اضافه شد، مشاهده گردید که یک بهبودی نسبی در زاویهٔ اصطکاک داخلی در ٣٪ وزنی خاک‌اره در کائولن نوع ١ صورت گرفته‌است که به‌میزان ٦٪ افزایش داشته‌است. سپس، با افزایش درصد خاک‌اره در نمونه‌های مورد مطالعه میزان φ یک روند کاهشی نمایان کرده‌است. در خاک رسی کائولن نوع ٢ افزودن خاک‌اره باعث کاهش در زاویهٔ اصطکاک داخلی شده‌است. در شرایط آزمایشی اشباع، برخلاف حالت خشک با افزودن خاک‌اره به نمونه‌های مورد مطالعه مشاهده شد یک روند افزایشی در میزان φ به‌وقوع پیوسته‌است؛ به‌طوری‌که با

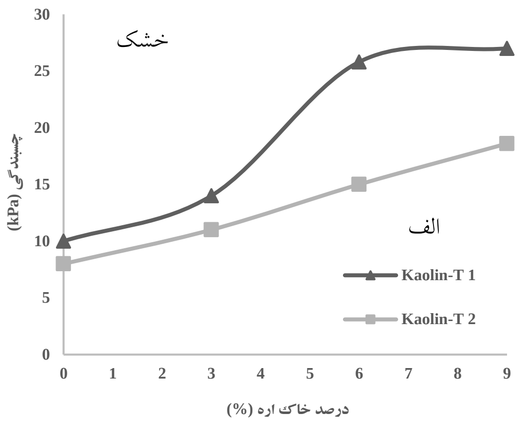
افزایش حضور خاک‌اره به‌مقدار ۹٪، زاویهٔ اصطکاک داخلی نمونه‌های تثبیت‌شده به حداکثر میزان خود می-رسد. این افزایش در خاک‌های رسی کائولن نوع ۱ و نوع ۲ به‌ترتیب تقریباً ۵۳٪ و ۴۹/۳٪ است. نتایج به‌دست‌آمده باتوجه به خاصیت جذب آب توسط ذرات خاک‌اره و فضای خالی بین ذرات قابل بیان است. در نمونه‌های اشباع جذب بیشتر رطوبت توسط ذرات اره و ایجاد تماس بیشتر بین آنها و ذرات رس، سبب گردیده‌است تغییرات زاویهٔ اصطکاک داخلی رفتار متفاوتی را در مقایسه با شرایط بارگذاری خشک داشته باشد.

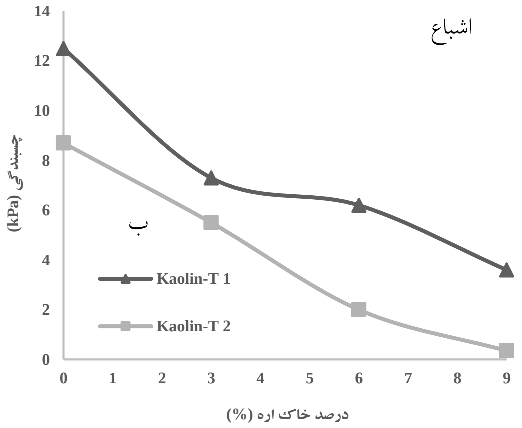


شکل ۵ تأثیر خاک‌اره برروی زاویهٔ اصطکاک داخلی مصالح مورد مطالعه: الف) حالت خشک، ب) حالت اشباع

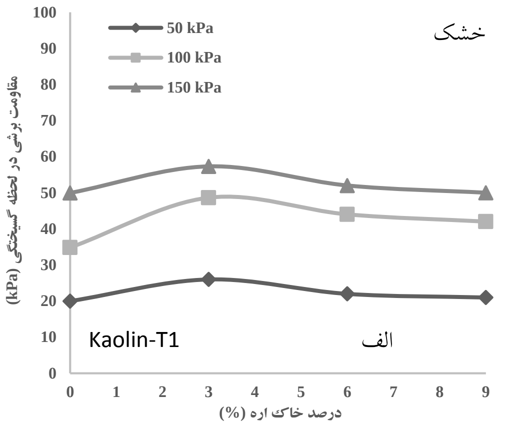
تأثیر خاک‌اره برروی میزان چسبندگی نمونه‌های خاکی ارزیابی شده‌است و نتایج مطالعه طبق شکل (۶- الف و ب) قابل مشاهده است. در شرایط تثبیت‌نشده، مشاهده می‌گردد که خاک رس کائولن نوع ۱ به‌دلیل خاصیت خمیری بالا در هر دو شرایط آزمایشی خشک و اشباع دارای بالاترین میزان چسبندگی است. هنگامی‌که ذرات خاک‌اره به نمونه‌ها اضافه شد مشاهده گردید که در شرایط آزمایشی خشک، چسبندگی با افزایش درصد حضور خاک‌اره در خاک‌های رسی یک روند افزایشی نشان داده‌است؛ به‌گونه‌ای که در ۹٪ خاک‌اره مقدار چسبندگی در خاک‌های رسی کائولن نوع ۱ و نوع ۲ به‌ترتیب ۱/۷ و ۱/۳ برابر افزایش یافته‌است. در شرایط آزمایشگاهی اشباع، مشاهده شد افزودن خاک‌اره باعث کاهش چسبندگی می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده باتوجه به میزان رطوبت و خصوصیات خمیری نمونه‌های رس قابل بیان است. مقدار رطوبت درصورتی‌که از حد بهینه تجاوز نماید، به‌علت ایجاد شرایط لغزندگی و صابونی شدن، خاک‌اره نمی‌تواند چسبندگی مناسبی را بین ذرات رس به‌وجود آورد. از سوی دیگر، در حالت خشک، به‌دلیل آن‌که آزمایش در شرایط رطوبت طبیعی محیط انجام گرفته‌است، حضور ذرات خاک‌اره باعث اندرکنش مناسب بین ذرات خاک رس شده‌است و سبب افزایش میزان چسبندگی نمونه‌های رس تثبیت‌شده گردیده‌است.

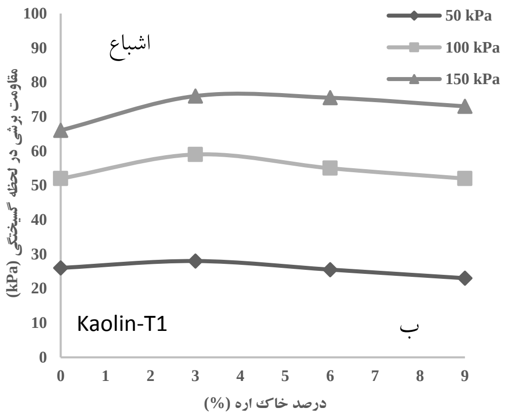
تأثیر خاک‌اره برروی مقادیر مقاومت برشی در لحظهٔ گسیختگی خاک‌های رسی کائولنی نوع ۱ و نوع ۲ در دو شرط آزمایشگاهی خشک و اشباع به‌ترتیب در شکل‌های (۷- الف و ب) و (۸- الف و ب) ارائه شده‌است. طبق شکل (۷- الف و ب) در شرایط آزمایشی خشک، مشاهده می‌شود که در خاک کائولن نوع ۱ هنگامی‌که ۳٪ خاک‌اره افزوده شود، مقاومت برشی نمونه خاک تثبیت‌شده به‌طور میانگین (در سه مقدار تنش قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال) به‌میزان ۲۶/۱ ٪ در مقایسه با حالت تثبیت‌نشده افزایش می‌یابد. در شرایط آزمایشی اشباع، می‌توان دریافت که افزودن خاک‌اره باعث بهبود مقاومت برشی خاک رس کائولن نوع ۱ می‌گردد؛ به‌گونه‌ای که افزودن ۳ درصد خاک‌اره به‌طور میانگین باعث افزایش ۱۲/۱٪ مقاومت برشی نمونه خاک تثبیت‌شده نسبت‌به حالت اصلاح‌نشده می‌گردد.





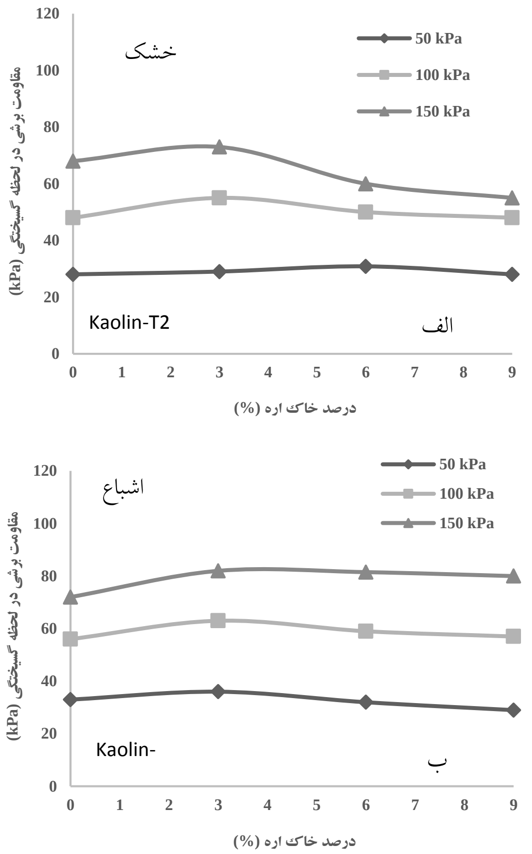
شکل ٦ تأثیر خاک‌اره برروی چسبندگی مصالح مورد مطالعه: الف) حالت خشک، ب) حالت اشباع





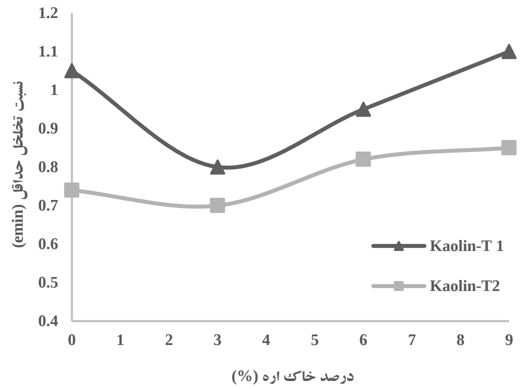
شکل ۷ تأثیر خاک‌اره برروی مقاومت برشی خاک رس کائولن نوع ۱: الف) حالت خشک، ب) حالت اشباع

باتوجه به شکل (۸- الف وب) می‌توان تأثیر خاک‌اره برروی میزان مقاومت برشی خاک رس کائولن نوع ۲ را مشاهده نمود. در شرایط آزمایش خشک میزان مقاومت برشی در نمونه خاک مورد مطالعه هنگامی‌که ۳٪ خاک‌اره افزوده شده‌باشد به‌مقدار ۸/۵٪ به‌طور میانگین (در سه تنش بارگذاری قائم) افزایش می‌یابد. در شرایط آزمایش اشباع، افزودن خاک‌اره به‌طور کلی باعث افزایش مقاومت برشی می‌شود ولی بیشترین تأثیر در مقدار ۳٪ خاک‌اره است که به‌طور میانگین سبب افزایش توانایی باربری خاک مورد مطالعه به‌میزان ۱۱/۷٦٪ می‌گردد. با در نظر گرفتن تأثیرگذاری خاک‌اره بر میزان تغییرات نسبت تخلخل حداقل و نحوهٔ قرارگیری ذرات رس در کنار ذرات اره، می‌توان طبق شکل (۹) دریافت که به‌دلیل آن‌که ۳٪ خاک‌اره در خاک رس کائولنی نوع ۱ فضای خالی کمتری را به‌وجود آورده و باعث گردیده تا نمونهٔ تثبیت‌شده تراکم‌پذیرتر گردد، درنتیجه، زاویهٔ اصطکاک داخلی بالاتری را ایجاد نموده و در حالت اشباع مقاومت برشی بالاتری را نسبت‌به شرایط بارگذاری خشک به‌وجود آورده‌است.



شکل ۸ تأثیر خاک‌اره برروی مقاومت برشی خاک رس کائولن نوع ۲: الف) حالت خشک، ب) حالت اشباع

هم‌چنین، نتایج به‌دست‌آمدهٔ حاصل از آزمون‌های برش مستقیم را می‌توان براساس تغییرات نسبت تخلخل حداقل (e_{min}) طبق شکل (۹) بیان نمود. باتوجه به نمودارها می‌توان دریافت در حالت تثبیت‌نشده، خاک رس کائولن نوع ۱ به‌دلیل خاصیت خمیری بالا نسبت تخلخل حداقل بالاتری در مقایسه با کائولن نوع ۲ دارد که بیان‌کنندهٔ شکل‌پذیری بیشتر آن است. هنگامی‌که خاک‌اره به نمونه‌های مورد مطالعه افزوده می‌شود مشاهده می‌گردد در حضور ۳٪ خاک‌اره فضای خالی بین ذرات خاک رس کائولنی کاهش می‌یابد که این میزان کاهش در کائولن‌های نوع ۱ و نوع ۲ به‌ترتیب ۲۴٪ و ۵/۴٪ می‌باشد. این شرایط بیان‌کنندهٔ آن است که ذرات خاک‌اره در رس-های کائولنی با خاصیت خمیری بالا تأثیرگذاری مناسب‌تری دارند. از سوی دیگر، با افزایش میزان خاک‌اره در درون ذرات رسی، فضای خالی بین ذرات بالا رفته که سبب سست شدن ساختار و ماتریس ذرات خاک می‌گردد که نتیجهٔ آن، کاهش میزان توانایی باربری است.

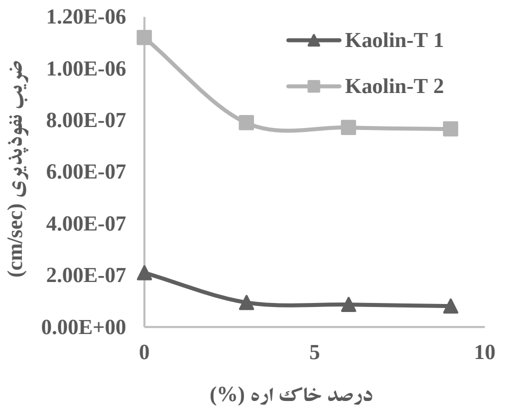


شکل ۹ تأثیر خاک‌اره برروی تغییرات نسبت تخلخل حداقل در نمونه‌های مورد مطالعه

نتایج حاصل از آزمایش نفوذپذیری

یکی از موضوعات مهم در خاک‌های ریزدانهٔ رسی، ارزیابی رفتار آنها تحت اثر جریان آب و برآورد میزان نفوذپذیری است. در تحقیق حاضر، تأثیر خاک‌اره برروی میزان نفوذپذیری خاک‌های رسی کائولنی مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج آن در شکل (۱۰) ارائه شده‌است. باتوجه به نمودارها می‌توان دریافت، در حالت تثبیت‌نشده میزان نفوذپذیری خاک رسی کائولن نوع ۲ در مقایسه با کائولن نوع ۱ باتوجه به نوع کانی آن (طبق جدول ٤) و حضور ذرات کوارتز بیشتر و پایین بودن خاصیت خمیری آن دارای مقدار بیشتری است. نتایج به‌دست‌آمده برخلاف مطالعات صورت‌گرفته توسط الحالم و البرودی [12] است. باتوجه به این‌که ۸۰٪ اندازهٔ ذرات خاک‌ارهٔ مورد مطالعه در تحقیق حاضر کمتر از ۱/۱۹ میلی‌متر انتخاب گردیده‌است، هنگامی‌که به نمونه‌های مورد مطالعه افزوده شد، مشاهده گردید میزان نفوذپذیری با افزایش حضور خاک‌اره در هر دو نوع خاک کائولن روند کاهندگی را طی نموده‌است. میزان نرخ کاهش نفوذپذیری نسبت‌به حالت تثبیت‌نشده به‌طور میانگین در نمونه خاک کائولن نوع ۱ و کائولن نوع ۲ به‌ترتیب برابر با ۵۸/۲٪ و ۳۰/۷٪

می‌باشد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت خاک‌اره با اندازهٔ ذارت ریز می‌تواند به‌عنوان یک آب‌بند در خاک‌های رسی کائولنی مورد استفاده قرار گیرد.

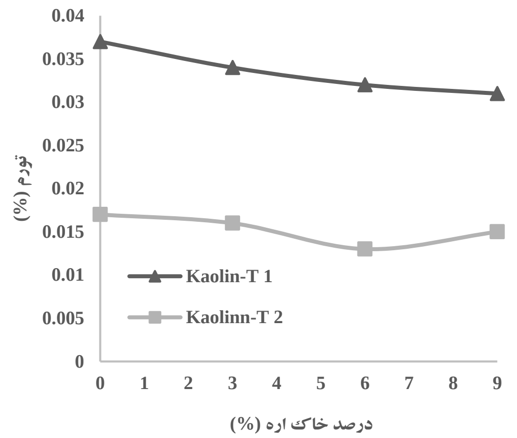


شکل ۱۰ تأثیر خاک‌اره برروی میزان نفوذپذیری خاک‌های رسی کائولنی مورد مطالعه

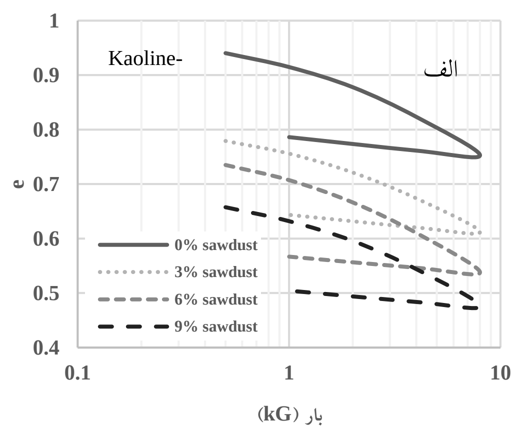
نتایج حاصل از آزمایش تحکیم

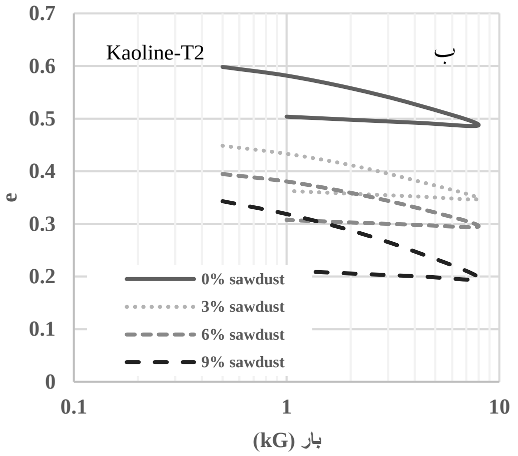
نشست تحکیم و تورم در خاک‌های ریزدانهٔ رسی ناشی از جذب آب و رطوبت از نمونه‌های رفتاری در خاک‌های مسئله‌دار می‌باشد. در این مطالعه، با انجام آزمایش تحکیم، تأثیر خاک‌اره برروی میزان نشست و تورم خاک‌های رسی کائولنی ارزیابی شده‌است. تأثیر خاک‌اره برروی میزان تورم آزاد نمونه‌های مورد مطالعه طبق شکل (۱۱) قابل مشاهده است. باتوجه به نمودارها می‌توان دریافت، در حالت تثبیت‌نشده خاک رس کائولن نوع ۱ به‌دلیل خواص خمیری بالا دارای پتانسیل تورمی بالاتری نسبت‌به خاک کائولن نوع ۲ است. هنگامی‌که به نمونه-های مورد مطالعه خاک‌اره افزوده می‌گردد مشاهده می‌شود به‌دلیل خاصیت جذب آب ذرات خاک‌اره میزان تورم کاهش یافته و از افزایش حجم جلوگیری شده‌است. میزان کاهش تورم به‌طور میانگین در خاک‌های کائولن نوع ۱ و نوع ۲ به‌ترتیب ۱۲/۶٪ و ۱۳/۶٪ می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده مطابق با مطالعات صورت‌گرفته توسط چمانی و همکاران [9]، رائوکاتسوارا [10] و مانوکاجی [1] می‌باشد.

هم‌چنین تغییرات میزان نسبت تخلخل و شاخص نشست تحکیم (Cs) برروی خاک‌های مورد مطالعه تحت اثر خاک‌اره به‌ترتیب در شکل (۱۲- الف و ب) و (۱۳) ارائه شده‌است. با مشاهدهٔ نمودارهای شکل (۱۲-الف وب) می‌توان دریافت در حالت کلی افزودن خاک‌اره باعث کاهش میزان نسبت تخلخل و نشست تحکیم در نمونه‌های خاکی مورد مطالعه می‌گردد. هم‌چنین، باتوجه به دیاگرام‌های شکل (۱۳) می‌توان مشاهده نمود در حالت تثبیت‌نشده خاک رس کائولن نوع ۱ میزان نشست تحکیمی بیشتری نسبت‌به خاک رس کائولن نوع ۲ دارد. زمانی‌که خاک‌اره به نمونه‌ها افزوده می‌شود مشاهده می‌گردد در ۳٪ خاک‌اره بیشترین اثر در کاهش نشست تحکیم نمایان است که این تأثیر در خاک رس کائولن نوع ۱ و نوع ۲ به‌ترتیب برابر ۱۶/۶٪ و ۱۵/۴٪ است.

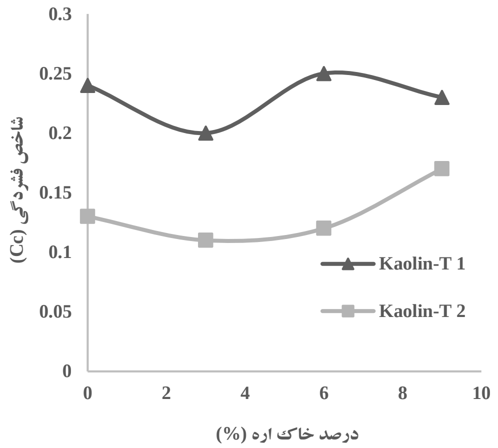


شکل ۱۱ تأثیر خاک‌اره برروی میزان تورم خاک‌های رسی کائولنی مورد مطالعه



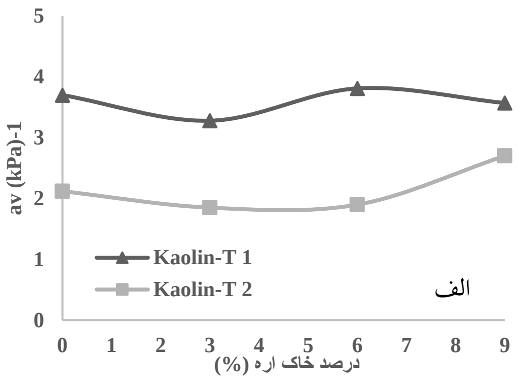


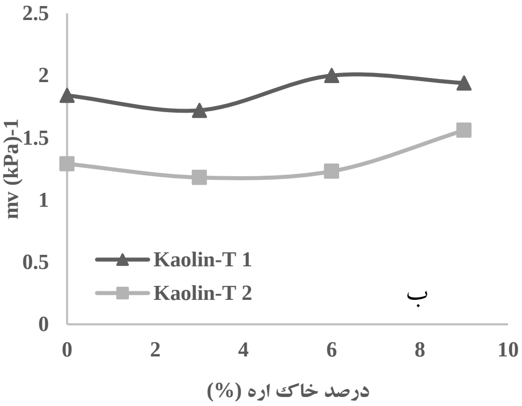
شکل ۱۲ تأثیر خاک‌اره برروی میزان نسبت تخلخل خاک‌های رسی کائولنی مورد مطالعه، الف) خاک رسی کائولنی نوع ۱، ب) خاک رسی کائولنی نوع ۲



شکل ۱۳ تأثیر خاک‌اره برروی میزان شاخص فشردگی (Cc) خاک‌های رسی کائولنی مورد مطالعه

در ادامه، تأثیر خاک‌اره برروی پارامترهای نشست تحکیم هم‌چون ضریب تراکم‌پذیری (av) و ضریب تغییر حجم (mv) نمونه‌های مورد مطالعه طبق شکل (۱٤-الف و ب) ارائه شده‌است. با مشاهدهٔ نتایج به‌دست‌آمده می‌توان دریافت مشابه حالت‌های ذکرشده در بالا، در شرایط تثبیت‌نشده خاک رس کائولن نوع ۱ دارای بیشترین میزان av و mv در مقایسه با خاک رس کائولن نوع ۲ می‌باشد. زمانی‌که به نمونه‌های مورد مطالعه ۳٪ خاک‌اره افزوده شد باعث کاهش تراکم‌پذیری و تغییر حجم نمونه‌های خاک رس کائولنی گردید. بنابراین میزان کاهش av در اثر خاک‌اره در خاک رس کائولن نوع ۱ و نوع ۲ به‌ترتیب ۱۱/۳٪ و ۷/۰٪ می باشد. هم‌چنین مقدار کاهش در mv در کائولن‌های نوع ۱ و نوع ۲ به‌ترتیب ٦/٥٢٪ و ۸/٥٢٪ است.





شکل ۱٤ تأثیر خاک‌اره برروی پارامترهای نشست تحکیم خاک‌های رسی کائولنی مورد مطالعه: الف) ضریب تراکم‌پذیری (av)، ب) ضریب تغییر حجم (mv)

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

خاک‌های متورم‌شونده از جمله خاک‌های مشکل‌آفرین در پروژه‌های عمرانی محسوب می‌شوند. تغییر حجم ناشی از تغییر رطوبت در آنها همواره موجب بروز خسارات فراوانی به سازه‌ها و بناهای ساخته‌شده برروی آنها (کانال‌های آبیاری و زهکشی، دیوارهای حائل، بزرگ‌راه‌ها و تونل‌ها) می‌شود؛ بنابراین باید با به‌کارگیری روش‌هایی خسارت‌های ناشی از تورم خاک‌ها را کاهش داد. هدف از تحقیق حاضر، بررسی تأثیر خاک‌اره به‌عنوان

یک مادهٔ ضایعاتی باطله برروی خواص مکانیکی و ژئوتکنیکی خاک‌های رس کائولنی با خواص خمیری متفاوت می‌باشد. در این مطالعه، خاک‌اره با درصدهای وزنی ۳، ٦ و ۹ با دو نوع خاک رس کائولنی به‌صورت تصادفی مخلوط گردید و رفتار خاک‌های تثبیت‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مطالعات نشان داد که در حالت کلی بهینه‌ترین مقدار ذرات خاک‌اره برای به‌سازی رفتار خاک رس برابر ۳٪ وزنی می‌باشد. دلایل آن را می‌توان به‌شرح ذیل بیان نمود:

۱. زمانی‌که ۳٪ خاک‌اره به نمونه‌های مورد مطالعه افزوده شد، نسبت تخلخل حداقل در خاک رس کائولن ۱ با خاصیت خمیری بالا به‌میزان ۲٤٪ کاهش یافت که نتیجهٔ آن افزایش تراکم‌پذیری و کاهش جذب آب است. با افزایش میزان حضور خاک‌اره رفتار تغییر یافت و باعث کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و ایجاد پوکی و افزایش جذب رطوبت گردید. این روند مشابه با مطالعات انجام‌یافته توسط مانوکاجی [1] و اولابایوده [13] می‌باشد.

۲. مخلوط کردن ۳٪ وزنی خاک‌اره در خاک رس کائولن نوع ۱ سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری (به‌میزان ۳۳٪)، مدول الاستیسیته (به‌میزان ۳/۵٪) و مقاومت برشی (به‌میزان ۲٦/۱٪ در حالت خشک و ۱۲/۱٪ در حالت اشباع) گردیده‌است. افزایش درصد خاک‌اره سبب کاهش میزان توانایی باربری گردید که مشابه با مطالعات انجام یافته توسط اولابایوده [13] است.

۳. خاک‌اره برروی رفتار تحکیمی خاک‌های رس مورد مطالعه نیز تأثیر گذاشته‌است؛ به‌طوری‌که، افزودن خاک‌اره باعث کاهش میزان نشست تحکیم در هر دو نمونهٔ مورد مطالعه گردیده‌است. هم‌چنین خاک‌اره برروی رفتار تحکیم هر دو نوع خاک رس کائولنی مؤثر است ولی در خاک کائولن نوع ۲ دارای تأثیرگذاری بیشتر می‌باشد؛ به‌طوری‌که ضریب تراکم‌پذیری (به‌میزان ۱۱/۳٪)و ضریب تغییر حجم (به‌میزان ۸/۵۲٪) افزوده شده‌است.

٤. در حالت کلی افزودن خاک‌اره باعث کاهش میزان نفوذپذیری در هر دو نوع خاک رس شده‌است. نتایج به‌دست‌آمده برخلاف مطالعات صورت‌گرفته توسط الحالم و البرودی [12] است؛ به‌دلیل آن‌که ۸۰٪ اندازهٔ ذرات خاک‌اره در مطالعهٔ حاضر کمتر از ۱/۱۹ میلی‌متر است، که این امر سبب کاهش میزان نفوذ پذیری گردیده‌است. هم‌چنین افزودن خاک‌اره در هر دو نوع رس کائولنی باعث کاهش مقدار تورم در نمونه‌های خاکی مورد مطالعه گردیده‌است. این روند مشابه با مطالعات صورت گرفته توسط مانوکاجی [1]، چمانی و همکاران [9] و رائوکتسوارا [10] است.

باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان اشاره نمود رفتار خاک ریزدانهٔ رسی تثبیت‌شده با ذرات خاک‌اره متأثر از نسبت تخلخل حداقل (e_{min}) و خاصیت جذب رطوبت و اندازهٔ ذرات چوب می‌باشد. در حالت تثبیت‌نشده خاک رس کائولن نوع ۱ به‌دلیل خاصیت خمیری بالا، نسبت تخلخل حداقل بیشتری در مقایسه با کائولن نوع ۲ دارد که بیان‌کنندهٔ فضای خالی زیاد بین ذرات و شکل‌پذیری بیشتر آن است. هم‌چنین حضور ذرات خاک‌اره و افزایش میزان حضور آنها در بین فضای ذرات خاک‌های کائولنی، سبب افزایش فضای خالی بین ذرات رس در نمونهٔ تثبیت‌شده گردیده و باعث سست شدن ساختار و ماتریس ذرات خاک گردیده‌است. در این شرایط میزان ظرفیت باربری و مقاومت نمونه‌های مورد مطالعه کاهش می‌یابد. البته خاصیت جذب آب توسط خاک‌اره بر رفتار ژئوتکنیکی خاک رس تثبیت‌شده تأثیر می‌گذارد. نتایج به‌دست‌آمده از مطالعهٔ حاضر نشان می‌دهد با افزودن خاک‌اره در خاک رس میزان تورم و نفوذپذیری کاهش یافته‌است. درانتها باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان بیان کرد، خاک‌ارهٔ درخت کاج با اندازهٔ ذرات کوچک‌تر از ۱/۱۹ میلی‌متر برروی خاک رسی کائولن با خاصیت خمیری بالا تأثیر بیشتری نسبت‌به خاک رس با خاصیت خمیری پایین داشته‌است؛ بنابراین از خاک رسی

تثبیت‌شده با خاک‌اره می‌توان برای احداث لایهٔ خاک بستر روسازی راه در معرض رطوبت، به‌سازی خاک زیر پی و در احداث ابنیه‌های ژئوتکنیکی استفاده نمود. البته نوع خاک‌اره، اندازهٔ آن و شرایط کاربرد آن (مرطوب و یا سوخته) می‌تواند بر رفتار ژئوتکنیکی خاک رسی تثبیت‌شده تأثیرگذار باشد که سعی می‌گردد در تحقیقات آینده مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

1. Manukaji, U., "The Effects of Sawdust Addition on the Insulating Characteristics Of Clays From The Federal Capital Territory Of Abuja", *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 3, No. 2, Pp. 6-19. (2013).

۲. نوظهور، س و فروغی اصل، ع.، «بررسی خواص مکانیکی بتن خاک‌اره‌ای»، فصل‌نامهٔ آنالیز سازه- زلزله، ج. ۱۴، ش. ۲، صص. ۱-۱۴، (۱۳۹۶).

3. Kontopoulos, N., "The Effects of Sample Disturbance on Pre-consolidation Pressure for Normally Consolidated and over consolidated Clays", Diploma In Civil Engineering, Civil And Environmental Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology. (2012).

4. Asadollahi,F. and Dabiri, R, "Effects of Glass Fiber Reinforced Polymer on Geotechnical Properties of Clayey Soil", *Journal of Structural Engineering and Geotechnics*, Vol. 7, No. 2, Pp. 73-83, (2017).

5. Sahebkaram A., A. and Dabiri, R, "Effects of the Fiber Types on Improving the Bearing Capacity of Clayey Soil", *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, Vol. 9, No. 1, Pp. 43-50, (2017).

6. FHWA, "Ground modification methods references manual", Vol. 1 and Vol. 2, U.s. Depart. Of Trans. Feder. High. Admin, (2017).

۷. سیروس‌پور، س.، پرویزی، م.، پروین‌نیا، م. و شکرالهی، ا.، «حذف نیترات از سیلاب‌های شهری تو سط فرایند فیلتر چندگانه»، نشریهٔ پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ج. ۲۴، ش. ۱، ۸۵-۱۰۱.(۱۳۹۶).

۸. کافی، ذ.، گنجی‌دوست، ح. و آیتی، ب.، «حذف رنگ از محلول آبی با خاک‌اره و رس بنتونیت»، *نشریهٔ عمران مدرس*، دورهٔ یازدهم، ش. ۳، صص. ۶۷-۱۲۵، (۱۳۹۰).

9. Chemani, B. and Chemani, H., "Effect of Adding Sawdust on Mechanical-Physical Properties of Ceramic Bricks to Obtain Lightweight Building Material", *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 11, Pp. 36-55. (2012).

10. Koteswara Rao, D., Anusha, M., Pranav, P.R.T. and Venkatesh, G., "A Laboratory Study On The Stabilization Of Marine Clay Using Saw Dust And Lime", *International Journal of Engineering Science & Advanced Technology*, Vol. 2, Pp. 851-862. (2012).

11. Edeh, J., Agbede, I. and Tyoyila, A., "Evaluation of Sawdust Ash-Stabilized Lateric Soil as Highway Pavement Material", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.26, Pp. 367-373, (2014).

12. El Halim, A. and El Baroudy, A., "Influence addition of Fine Sawdust on Physical Properties of

Expansive Soil in the Middle Nile Delta, Egypt", *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, Vol.14, No.2, pp :483-490, (2014).

13. Olubayode, S. A., Olateju, O. T., Awokola, O. S., Dare, E. O., Akinwamide, J. T. and Eshiett, I. M.,"Engineering Properties od Sawdust Modified Clay Soil"**,** *International Journal of Pure & Applied Bioscience*, Vol. 3, No. 5, Pp. 35-41, (2015).
14. Naranagowda, M. J., Nithin, N. S., Maruthi, K. S. and Mosin Khan, D. S., "Effect of Sawdust Ash And Fly Ash on Stability of Expansive Soil"**,** *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol. 4, No.7, Pp. 83-96, (2015).
15. Khan, S. and Khan, H., "Improvement of Mechanical Properties by Waste Sawdust Ash Addition into Soil", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 20, Pp.1901-1914, (2015).
16. Kumar, R. and Jain, P., "Prediction of Compression Index (Cc) of Fine Grained Remolded Soils from Basic Soil Properties", *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 11, No.1, Pp. 592-598, (2016).
17. Iran China Clay Industries Company, Marand, East Azerbaijan, Iran. www.icckaolin.com.
18. ASTM D421-85, "Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants", Annual book of ASTM standards, (1985).
19. ASTM D422-63, "Standard Test Method for article-Size Analysis of Soils", Annual book of ASTM standards, (1963).
20. ASTM D 4318-95a, "Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index for Soils", Annual book of ASTM standards, (1995).
21. ASTM D 854-02, "Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer", Annual book of ASTM standards, (2002).
22. ASTM-D 698-00, "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft^3 (600 kN-m/m^3))", Annual book of ASTM standards, (2000).
23. ASTM D2166-16, "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil", Annual book of ASTM standards, (2016).
24. ASTM D3080-11, "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions", Annual book of ASTM standards, (2011).
25. ASTM D5084-03, "Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using Flexible Wall Permeameter", Annual book of ASTM standards, (2003).
26. ASTM D2435-11, "Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading", Annual book of ASTM standards, (2011).